中国生态农业学报 2016 年 1 月 第 24 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2016, 24(1): 121−130

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150849

生态文明视角下四川省资源环境压力的时空变化特征*

赵先贵[1] 马彩虹[2] 赵 晶[3] 肖 玲[1] 赵 超[1]

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院 西安 710062; 2. 宁夏大学资源环境学院 银川 750021;
3. 西安石油大学思想政治理论教学科研部 西安 710065)

摘 要 基于足迹家族原理，构建了由生态压力、温室气体(GHGs)排放、水资源压力构成的资源环境压力评价指标体系，并应用于四川省的资源环境压力评价。结果表明，1990—2013 年四川省人均生态足迹增加 109.57%，生物承载力变化不大，生态压力由中下(Ⅱ$_a$)升至很高(Ⅲ$_b$)等级；林业碳汇提高 32.01%，GHGs 排放虽保持较低(Ⅰ$_b$)等级，但其排放指数增高了 234.97%；水足迹增速很小，水资源压力很低(Ⅰ$_a$)；全省资源环境压力由很低(Ⅰ$_a$)升为中下(Ⅱ$_a$)。空间上，生态压力很低(Ⅰ$_a$)的是甘孜和阿坝，广元为中上(Ⅱ$_b$)，成都、自贡和攀枝花等其余 19 市(州)很高(Ⅲ$_b$)；GHGs 排放状况，攀枝花很高(Ⅲ$_b$)，内江较高(Ⅲ$_a$)，乐山中上(Ⅱ$_b$)，眉山中下(Ⅱ$_a$)，甘孜、雅安和阿坝为碳汇(Ⅰ$_a$)，成都、自贡和泸州等其余 14 市(州)均属较低(Ⅰ$_b$)等级；水资源压力方面，自贡、遂宁、眉山、内江和资阳很高(Ⅲ$_b$)，成都较高(Ⅲ$_a$)，泸州和达州为中上(Ⅱ$_b$)，德阳为中下(Ⅱ$_a$)，宜宾和攀枝花较低(Ⅰ$_b$)，甘孜、阿坝和广安等其余 10 州(市)很低(Ⅰ$_a$)；资源环境压力状况，阿坝、甘孜、雅安和广元很低(Ⅰ$_a$)，凉山和绵阳较低(Ⅰ$_b$)，广安、巴中和南充为中下(Ⅱ$_a$)，宜宾、德阳、乐山和达州为中上(Ⅱ$_b$)，泸州、资阳和成都较高(Ⅲ$_a$)，遂宁、攀枝花、眉山、自贡和内江很高(Ⅲ$_b$)。研究表明，四川省的资源环境压力主要归因于较高的生态压力。今后的生态文明建设中，除了严守耕地生态红线以确保耕地生产力外，还要通过大力发展水电以优化能源消费结构，以及加强森林保育以提高碳汇潜力。

关键词 足迹家族 生态足迹 水足迹 碳足迹 生态文明 资源环境压力
中图分类号: F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)01-0121-10

Spatio-temporal changes in resource environment pressure due to eco-civilization in Sichuan Province, China*

ZHAO Xiangui[1], MA Caihong[2], ZHAO Jing[3], XIAO Ling[1], ZHAO Chao[1]

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. School of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Department of Ideological and Political Theory Teaching and Research, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract In recent years, the construction of eco-civilization in China has unprecedentedly attracted the attention of stakeholder authorities. One of the important issues of the construction of eco-civilization is the evaluation of regional resource environment pressure. Because of the variety and complexity of resources and environmental problems, it is not so easy to evaluate resource environment pressure. The Footprint Family method takes into account factors such as land and water resource carrying capacity, carbon emissions, forestry carbon sequestration and sustainable development. It therefore covers the basic connotation of eco-civilization construction. However, less domestic research has been reported on resource environment pressure in relation to Footprint Family. In this study, an evaluation system was constructed for resource environment pressure evaluation based on Footprint Family. The system was tested in the evaluation of resource environment pressure in Sichuan Province, where lies in the Silk Road Economic Belt, in order to promote the construction of eco-civilization

* 国家社会科学基金项目(14XKS019)资助
赵先贵，研究方向为生态评价与规划。E-mail: zhaoxg@snnu.edu.cn
收稿日期: 2015−07−26 接受日期: 2015−11−03

* Funded by the National Social Science Fundation of China (No. 14XKS019)
Corresponding author, ZHAO Xiangui, E-mail: zhaoxg@snnu.edu.cn
Received Jul. 26, 2015; accepted Nov. 3, 2015

and development of eco-civilization legislation and systematical construction. The results showed that per capita ecological footprint increased by 109.57% whereas per capita biocapacity had no obvious change from 1990 to 2013. Therefore, ecological pressure index increased from below-average ($Ⅲ_a$) to very high level ($Ⅲ_b$) in the period. In the same period, forestry carbon sequestration increased by 32.01%, greenhouse gases (GHGs) emissions remained at low grade ($Ⅰ_b$), while GHG emission index sharply increased by 234.97%. As the growth of water footprint was very small, water resource pressure was very small too ($Ⅰ_a$). However, decrease in available water resource was not negligible. Pressure on provincial resources and environment increased from very low ($Ⅰ_a$) to below-average ($Ⅱ_a$) grade. Spatially, ecological pressure was at very low grade ($Ⅰ_a$) in Ganzi and Aba, at above-average grade ($Ⅱ_b$) in Guangyuan, and at very high grade ($Ⅲ_b$) in other regions. GHG emission index was very high ($Ⅲ_b$) in Panzhihua, high ($Ⅲ_a$) in Neijiang, above-average ($Ⅱ_b$) in Leshan, below-average ($Ⅱ_a$) in Meishan, with carbon sequestration at $Ⅰ_a$ (very low) grade in Ganzi, Ya'an and Aba, and $Ⅰ_b$ (very low) grade in other regions. Water resource pressure was at very high grade ($Ⅲ_b$) in Zigong, Suining, Meishan, Neijiang and Ziyang. It was at high grade ($Ⅲ_a$) in Chengdu, above-average ($Ⅱ_b$) in Luzhou and Dazhou, below-average grade ($Ⅱ_a$) in Deyang, low grade ($Ⅰ_b$) in Yibin and Panzhihua , and was at very low grade ($Ⅰ_a$) in other regions. Resource environment pressure was at very low grade ($Ⅰ_a$) in Aba, Ganzi, Ya'an and Guangyuan, low grade ($Ⅰ_b$) in Liangshan City and Mianyang, below-average ($Ⅱ_a$) in Guang'an, Bazhong and Nanchong, above-average ($Ⅲ_b$) in Yibin, Deyang, Leshan and Dazhou, high grade ($Ⅲ_a$) in Luzhou, Ziyang and Chengdu, and very high grade ($Ⅲ_b$) in Suining, Panzhihua, Meishan, Zigong and Neijiang. Therefore resource environment pressure was due mainly to high ecological pressure driven by the large population with relatively little cultivated land per capita in Sichuan Province. The construction of future eco-civilization should strictly be adapted to cultivated land policies that were in turn based on ecological red-lines to ensure productive cultivation. In addition, the optimization of energy consumption structure by vigorously developing hydropower and strengthening forest conservation to improve forest carbon sink capability was an indispensable option in Sichuan Province.

Keywords Footprint Family; Ecological footprint; Water footprint; Carbon footprint; Eco-civilization; Resource environment pressure

面对金融危机和生态危机，中国提出了绿色、循环、低碳发展的生态文明建设理念[1]，生态文明建设成为热点[2]。党的十七大报告提出了生态文明建设的概念和内涵，即建设以资源环境承载力为基础、以自然规律为准则、以可持续发展为目标的资源节约型、环境友好型社会。可见，区域资源与环境的压力及其可持续性是生态文明建设首先要考虑的关键问题。资源与环境压力的评价方法很多，常用的有多指标综合评价法[3−5]、模型法[6−7]、足迹法[8−9]等。多指标综合评价法的缺点在于评价因子的选取受人为因素影响大；而模型法的不足在于有些模型仅提供评价框架(如 PSR 模型)，有些模型提供分析影响因子的模式(如 IPAT 模型)，但评价因子的选择仍受人为因素的影响；常见的生态足迹、水足迹等方法虽弥补了上述不足，但由于资源与环境的多样性和复杂性，任何单一的指标都难以全面评价某一区域资源环境的压力。足迹家族法(包括生态足迹、碳足迹、水足迹)与国际接轨[10−12]，不受主观因素的影响，且考虑了土地和水资源承载力、碳排放与林业碳汇及可持续发展等问题，涵盖了认识、尊重、顺应、利用和改造自然，以造福人类的生态文明建设的基本内涵[2]。但该方法缺少评价指标的细化、整合及等级划分标准。有关足迹家族的实证研究，除了欧盟的一个星球经济网络(OPEN：EU)项目曾完成包括中国在内的 45 个国家和地区的足迹家族指标的测算外[11]，有关省、市尺度的实证研究，特别是基于足迹家族的资源环境压力的研究，至今鲜见报道。本文构建了基于足迹家族的资源环境压力评价体系，并应用于丝绸之路经济带重要的中转集散地——四川省的资源环境压力评价，以期为相关部门在生态红线、生态补偿等生态文明制度建设方面提供科学依据。

1 研究区概况

四川省位于东经 92°21′~108°12′，北纬 26°03′~34°19′。面积 48.6×10^4 km^2，辖 21 个市(州)。气候可以分为四川盆地中亚热带湿润气候区、川西南山地亚热带半湿润气候区和川西北高山高原高寒气候区等类型区。地貌复杂多样，山地占 77.1%、丘陵占 12.9%、平原占 5.3%、高原占 4.7%。土地利用中耕地比例很低，仅占全省土地面积的 12.4%，主要分布在盆地和低山丘陵区，林地和牧草地比例较大(68.9%)，主要分布在盆周山地和西部高山高原。动植物资源丰富，植被类型多样，有高等植物近万种，仅次于云南省居全国第二位；脊椎动物约占全国总数的 45%以上；兽类 217 种，鸟类 625 种，合计约占全国总数的 53%。能源资源非常丰富且以水能、煤炭和天然气为主，分别占 75%、23.5%、1.5%。其中，水能资源蕴藏量超过 1×10^8 kW·h，是全国最大的水

电基地；煤炭保有资源储量 122.7 t，种类齐全，主要分布于川南地区；天然气储量达 7×10^{12} m^3，约占全国储量的 19%。水资源丰富，流域面积 10 000 km^2 以上河流 17 条，500 km^2 以上的河流 325 条，100 km^2 以上的河流 1 065 条，有“千河之省”的称号。水资源总量约 3 489.70 m^3，人均占有量高于全国平均水平。四川省也是我国人口大省，2013 年常住人口 8 107×10^4 人，居于全国第 5 位，但人均土地面积低于全国平均水平，人地矛盾十分突出。

2　研究方法

2.1　足迹家族法

虽然已有很多新的足迹类型的出现，但目前除了生态足迹、碳足迹和水足迹外，其余足迹由于缺乏明确的核算方法，暂不宜纳入足迹家族。本文采用 Galli 等[10–11]的定义：足迹家族由生态足迹、碳足迹和水足迹组成，用于评估人类对生物资源和水资源的需求以及温室气体(GHGs)排放对环境的影响。

2.1.1　生态足迹

生态足迹是人类活动对生物圈需求的度量；生物承载力指生物生产土地和海域能够提供给人类消费的生态服务总量；生态足迹与生物承载力之差值为正即为生态赤字，为负则为生态盈余[13]。生态足迹分为生物质足迹和能源足迹；生态赤字可分为生态硬赤字(生态赤字且生物质赤字)与生态软赤字(生态赤字但生物质盈余)。公式如下：

$$\mathrm{ef}=\sum_{i=1}^{n}(c_i/p_i)\times r_j \quad (i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,3,4,5,6) \tag{1}$$

$$\mathrm{ec}=\sum_{j=1}^{6}(a_j\times r_j\times y_j) \quad (j=1,2,3,\cdots,6) \tag{2}$$

式中：ef 为生态足迹(hm^2)，ec 为生物承载力(hm^2)，c_i 为第 i 种消费品人均消费量，p_i 为第 i 种消费品全球平均产量，r_j 为均衡因子，i 为消费品种类，j 为生物生产面积类型，a_j 为人均实际拥有生物生产面积，y_j 为产量因子。

本文的均衡因子取值于全球足迹网最新公布的结果[13]，耕地和建筑用地为 2.51，水域为 0.37，草地为 0.46，林地为 1.26；耕地和建设用地的产量因子依据四川省历年的粮食平均产量与全球平均产量相比较而获得。其余土地类型的产量因子依据文献[14–16]取其平均值，草地为 0.34，林地为 0.91，水域为 0.81。

2.1.2　碳足迹

碳足迹是人类活动过程中直接和间接的 GHGs 排放量[10–11]。本文采用《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》和基于 IPCC 的《省级温室气体编制指南》推荐的方法，其计算公式和因子取值见文献[17–18]。碳足迹以 t CO_2e(CO_2 当量)表示。

2.1.3　水足迹

水足迹由直接水足迹(实体水的使用)和间接水足迹(虚拟水的使用)两部分组成，间接水足迹等于某种消费品的消费量与其单位产品的虚拟水含量的乘积[19–20]，即：

$$\mathrm{wf}=\mathrm{wu}+\sum_{i=1}^{n}(p_i\times \mathrm{vwf}_i) \quad (i=1,2,3,\cdots,n) \tag{3}$$

式中：wf 为人均水足迹(m^3)；wu 为人均直接水足迹；p_i 为第 i 种消费品的人均消费量；vwf_i 为该消费品单位产品的虚拟水含量，取值见文献[21–22]。

2.2　资源环境压力评价体系的构建

基于足迹家族原理，本文提出由生态压力指数(EPI)、GHGs 排放指数(CEI)、水资源压力指数(WPI)综合而成的资源环境压力指数(RPI)。文中各种指数皆采用极值法进行标准化；EPI、WPI 的最大值分别取 3、1。

依据作者的研究结果[23–24]，生态压力指数是指某一区域生物质足迹与生物承载力的比率，以反映区域生态安全程度。水资源压力指数定义为区域水足迹与其可用水资源量的比值，以反映水资源压力状况[25]。为了评价区域 GHGs 排放对全球气候变化贡献的大小，本文借鉴作者提出的人均 GHGs 排放指数(C_p)、单位面积 GHGs 排放指数(C_a)以及由 C_p 和 C_a 综合而成的 GHGs 排放指数[17]。其中，C_p 定义为区域人均碳足迹与应对全球气候变化目标的人均碳足迹的比值；C_a 定义为单位面积的碳足迹(碳足迹密度)与应对全球气候变化目标的碳足迹密度的比值(面积换算为生物承载力的生物生产面积)。Stern[26]提出了人均 2 t CO_2e 作为各国承担减排义务的目标。2014 年 WWF[27]公布的 2010 年全球生物承载力为 120×10^8 hm^2(人均 1.7 hm^2)，故应对全球气候变化目标的碳足迹密度为 1.18 $t\cdot hm^{-2}$。在 C_p 和 C_a 两个概念的基础上，可构建区域 GHGs 排放指数(CEI)。为了减少主观因素的影响，本文权重的确定选用客观的熵权法[4]。该方法的原理是根据各指标的测算值所提供的信息量的大小来确定其权重。设有 m 个评价指标，n 个评价对象(本文 n 为评价的年数)，首先计算第 i 年第 j 项指标值(x_{ij})占该指标总值的比重(r_{ij})，再计算第 j 项指标的熵值(e_j)，然后计算第 j 项指标的变异性系数，即信息冗余度(d_j)，最后计算各指标的权重(w_j)，有关计算公式如下：

$$r_{ij}=x_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{n}x_{ij} \quad (i=1,2,3,\cdots,m;\ j=1,2,3,\cdots,n) \tag{4}$$

$$e_j = -\sum r_{ij} \ln r_{ij} / \ln n \tag{5}$$

$$d_j = 1 - e_j \tag{6}$$

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^{m} d_j \tag{7}$$

GHGs 排放指数计算方法如下:

$$\text{CEI} = w_{\text{p}} \times \frac{C_{\text{p}}}{C_{\text{p.max}}} + w_{\text{a}} \times \frac{C_{\text{a}}}{C_{\text{a.max}}} \tag{8}$$

式中: $C_{\text{p.max}}$、$C_{\text{a.max}}$ 分别为全球人均碳足迹、碳足迹密度的最大值, 分别取值 15 和 20; w_{p}、w_{a} 为权重, 其值分别为 0.500 1 和 0.499 9。

为了便于判断某一区域资源环境压力总体状况, 在上述 EPI、CEI、WPI 3 个指数的基础上, 构建出资源环境压力指数(RPI)。通过熵权法确定的 3 种指数在资源环境压力评价中的权重依次为 0.333 0、0.333 9、0.333 1, 分别以 w_{e}、w_{c}、w_{w} 表示, 资源环境压力指数计算方法如下:

$$\text{RPI} = \text{EPI} \times w_{\text{e}} + C\text{EI} \times w_{\text{c}} + \text{WPI} \times w_{\text{w}} \tag{9}$$

相应指数的等级划分标准见表 1。

表 1 资源环境压力指数等级划分标准

Table 1 Grading criteria of resource environment pressure index

等级 Grade	Ⅰ		Ⅱ		Ⅲ	
表征状态 Token state	低压力 Low pressure		中等压力 Medium pressure		高压力 High pressure	
亚级 Sub-grade	Ⅰ$_{\text{a}}$	Ⅰ$_{\text{b}}$	Ⅱ$_{\text{a}}$	Ⅱ$_{\text{b}}$	Ⅲ$_{\text{a}}$	Ⅲ$_{\text{b}}$
生态压力指数(EPI) Ecological press index (EPI)	<0.30	0.30~0.39	0.4~0.49	0.50~0.59	0.60~0.69	≥0.70
表征状态 Token state	很低 Very low	较低 Low	中下 Below average	中上 Above average	较高 High	很高 Very high
温室气体(GHGs)排放指数 Greenhouse gas emission index (CEI)	<0	0~0.39	0.40~0.49	0.50~0.59	0.60~0.69	≥0.70
表征状态 Token state	碳汇 Carbon sinks	较低 Low	中下 Below average	中上 Above average	较高 High	很高 Very high
水资源压力指数 Water resource press index (WPI)	<0.30	0.30~0.39	0.40~0.49	0.50~0.59	0.60~0.69	≥0.70
表征状态 Token state	很低 Very low	较低 Low	中下 Below average	中上 Above average	较高 High	很高 Very high
资源环境压力指数 Resource environment press index (RPI)	<0.30	0.30~0.39	0.40~0.49	0.50~0.59	0.60~0.69	≥0.70
表征状态 Token state	很低 Very low	较低 Low	中下 Below average	中上 Above average	较高 High	很高 Very high

2.3 数据来源

研究所需的数据主要来源于中国经济与社会发展统计数据库、中国及四川统计局网站、电子年鉴、中经网产业数据库, 以及 1991—2014 年的四川省统计年鉴、中国能源统计年鉴、中国统计年鉴、中国农村统计年鉴、中国林业统计年鉴和中国奶业统计年鉴等, 另外也通过四川省及其各市林业厅、农业厅等行业主管部门补充缺少的数据。

3 结果与分析

3.1 四川省资源环境压力的动态变化特征

3.1.1 生态足迹、碳足迹与水足迹的动态分析

四川省人均生态足迹由 1990 年的 1.62 hm^2 逐年增高至 2013 年的 3.39 hm^2, 增幅为 109.57%, 年均增加 3.27%(图 1)。其中人均能源足迹由 0.50 hm^2 增高至 1.06 hm^2, 人均生物质足迹从 1.12 hm^2 增加到 2.32 hm^2; 人均生物承载力波动在 0.77~0.83 hm^2; 同期人均生态赤字由 0.79 hm^2 逐年增加到 2.56 hm^2, 增高 222.93%, 年均增高 5.23%, 人均生物质赤字由 0.29 hm^2 增加至 1.50 hm^2。生态赤字和生物质赤字的不断增高说明四川省的生态需求已超出了生态系统的承载能力, 其发展是不可持续的。虽然农业高新技术的推广应用使耕地产量因子自 1990 年以来提高 17.71%, 提升了单位土地面积的生物承载力, 但由于人口增长和耕地面积减少(同期人口增加 3.47%, 耕地面积减少 0.86%), 抵消了人均生物承载力的增加。

1990—2013 年, 四川省碳足迹呈明显上升趋势(图 2), 从 11 688.26×10^4 t 上升为 40 537.96×10^4 t, 增幅 246.83%, 年均增高 5.56%。其中, 能源消费碳足迹从 10 078.25×10^4 t 增长到 32 717.35×10^4 t, 增幅 224.63%, 年均增高 5.25%; 水泥生产过程产生的碳足迹从 376.39×10^4 t 增长到 5 607.48×10^4 t, 增幅 1 389.81%, 年均增加 12.46%; 农业生产过程产生的碳足迹从 4 282.16×10^4 t 逐年增加到 5 820.36×10^4 t, 增幅 35.92%, 年均增高 1.34%; 林业固碳从 3 647.45×10^4 t 增加到 4 814.91×10^4 t, 增加 32.01%, 年均增率 1.21%; 废弃物处理过程产生的碳足迹从 598.92×10^4 t 增加到 1 207.68×10^4 t, 增高 101.64%, 年均增加 3.10%。全省人均碳足迹由 1990 年的 1.49 t 增加到 2013 年 5.00 t, 2013 年人均 GHGs 排放量是应对气候变化目标的 2.5 倍。从 1990—2013 年各部门 GHGs 的构成

比例看, 能源消费产生的温室气体占 GHGs 总量(未扣除林业碳汇, 下同)的比例为 62.15%~74.73%, 水泥占 2.45%~12.36%, 农业占 12.79%~ 29.90%, 废弃物处理占 2.41%~3.92%, 而林业固碳占总 GHGs 的比例为 9.86%~23.78%。可见能源消费是引起四川省碳足迹增高的主要原因, 而林业固碳可以中和全省约 10%~24%的温室气体排放。虽然四川省的人均碳足迹与其他省份相比并不高, 但由于该省的 GHGs 排放的增速远大于林业碳汇的增速, 因此, 碳减排和植被保育仍不容忽视。

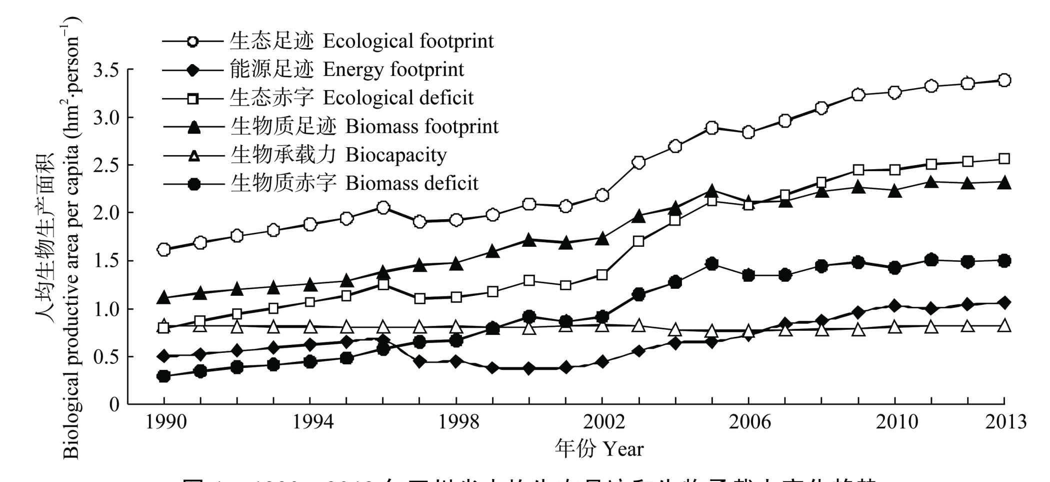


图 1　1990—2013 年四川省人均生态足迹和生物承载力变化趋势

Fig. 1　Changes of ecological footprint and biocapacity per capita in Sichuan Province from 1990 to 2013

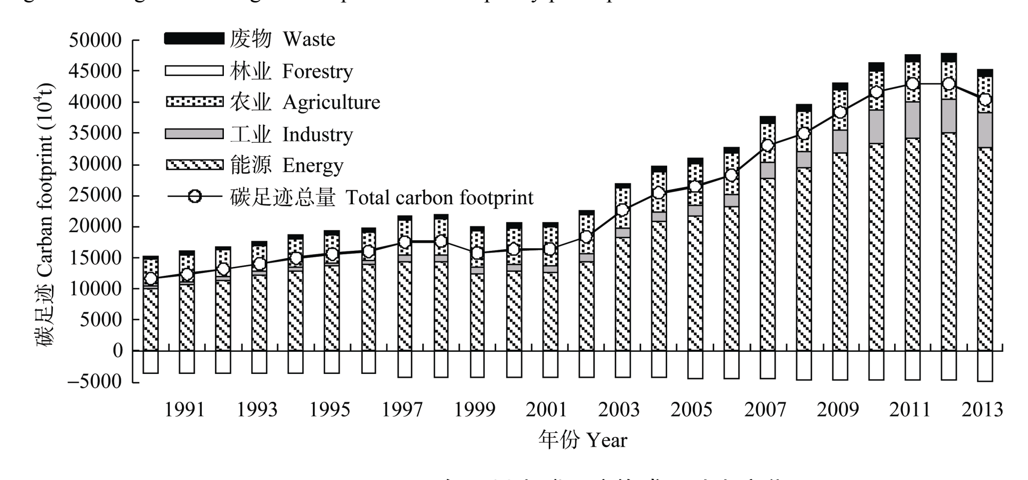


图 2　1990—2013 年四川省碳足迹构成及动态变化

Fig. 2　Components and dynamic changes of carbon footprint in Sichuan Province from 1990 to 2013

四川省人均水足迹由 1990 年的 494.92 m^3 上升到 2013 年的 554.02 m^3, 提高了 11.94%, 年均增加 0.49%(图 3)。其中人均实体用水量由 95.98 m^3 增加到 130.09 m^3, 增高 35.54%, 年均增加 1.33%; 人均虚拟水由 398.95 m^3 波动增加到 423.94 m^3。人均可用水资源量由 3 305.34 m^3 波动减少到 3 116.22 m^3, 减少了 5.72%, 年均减少 0.26%; 同期人口增加 3.47%, 说明四川省人均水资源量的减少不仅是人口增加引起的, 可能还存在气候暖干化的现象, 值得关注。

3.1.2　资源环境压力动态分析

从本文的研究结果看(图 4), 1990—2013 年, 四川省生态压力状况可划分为 4 个阶段: 1990—1992 年为中下(Ⅱ$_a$), 1993—1996 年为中上(Ⅱ$_b$), 1997—2001 年为较高(Ⅲ$_a$), 2002 年以后升为很高(Ⅲ$_b$)等级。GHGs 排放虽然为较低(Ⅰ$_b$)等级, 但其排放指数由 0.06 增加至 0.21, 增高了 234.97%; 水资源压力指数在 0.14~0.26 间波动, 属很低(Ⅰ$_a$)等级; 资源环境压力可划分为 3 个时期: 1990—1997 年为很低(Ⅰ$_a$)等级, 1998— 2003 年升为较低(Ⅰ$_b$)等级, 2004 年以后再升高为中下(Ⅱ$_a$)等级。

3.2　四川省资源环境压力的空间差异特征

3.2.1　生态足迹、碳足迹与水足迹的空间差异分析

四川省各市(州)2013 年人均生态足迹可分为两大类(表 2), 南充、甘孜、遂宁、巴中、阿坝、德阳、绵阳和广元 8 市(州)的人均生态足迹较低(<3 hm^2),

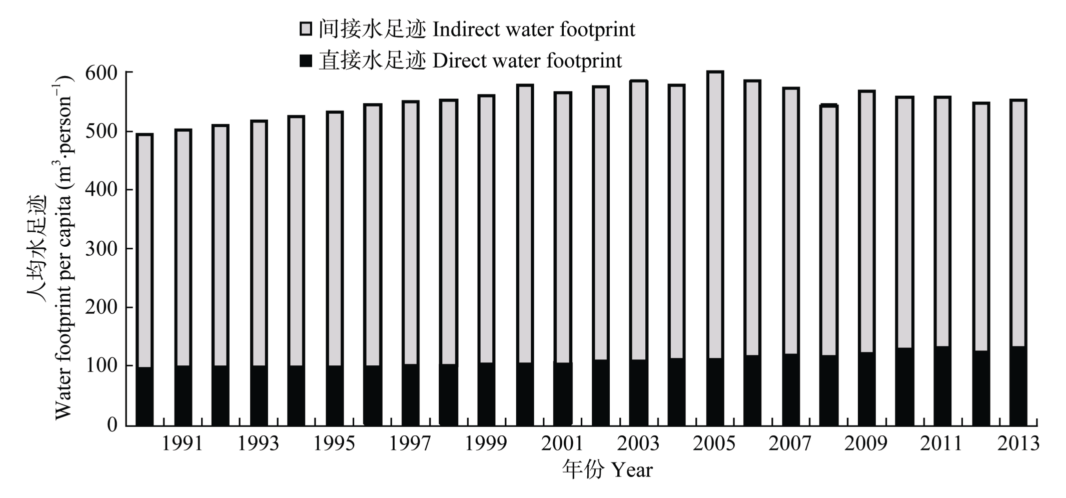


图 3 1990—2013 年四川省人均水足迹的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of water footprint per capita in Sichuan Province from 1990 to 2013

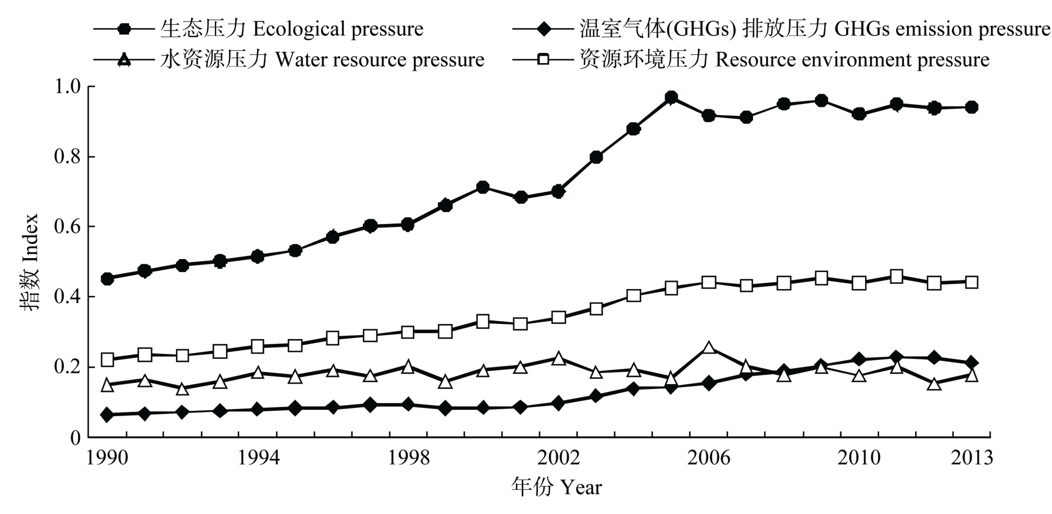


图 4 1990—2013 年四川省资源环境压力指数的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of resource environment pressure indexes in Sichuan Province from 1990 to 2013

其余 13 市(州)则较高(>3.6 hm^2)，攀枝花市的人均生态足迹高达 15.27 hm^2，其中能源足迹为 11.47 hm^2，显然这是该市的钢厂等高能耗工业所致；人均生物承载力可分为 3 大类，较高的是阿坝州和甘孜州，分别为 5.02 hm^2 和 5.94 hm^2，其次是雅安、广元、凉山州(1.21~1.36 hm^2)，其余地区较低(0.30~0.88 hm^2)；人均生态赤字较高的有攀枝花、内江、宜宾、乐山、眉山、自贡和泸州(>4 hm^2)，其次是达州、广安、成都、资阳、凉山、雅安、德阳(2.15~3.97 hm^2)，再次为绵阳、遂宁、巴中、广元和南充(1.65~1.94 hm^2)，阿坝州和甘孜州则存在生态盈余，分别为 2.41 hm^2 和 3.71 hm^2。2013 年人均碳足迹较高的有攀枝花、眉山、内江和乐山(9.30~35.31 t)；雅安、甘孜和阿坝的人均碳足迹为负值(−18.61~−10.83 t)，为碳汇；南充市的人均碳足迹为 1.96 t，低于全球应对气候变化目标的限定值(2 t)；该省其余地区的人均碳足迹居中(2.68~5.62 t)。2013 年人均水足迹较高的有攀枝花、自贡、资阳、泸州、内江和凉山(601.65~826.14 m^3)，其次是广安、乐山、成都、眉山、德阳、宜宾、巴中和绵阳(505.81~596.80 m^3)，其余地区的较低(431.64~498.34 m^3)。其中，巴中、阿坝、遂宁、宜宾、甘孜、南充、达州、泸州和凉山的人均实体用水量较低(47.17~96.83 m^3)，其余地区较高(>100 m^3)，攀枝花高达 336.09 m^3；人均虚拟水较低的有甘孜、遂宁、广元、南充、德阳和绵阳(<400 m^3)，较高的是凉山、雅安、泸州、资阳和自贡(>500 m^3)，其余地区居中。人均可用水资源量居前 3 位的是甘孜(48 349 m^3)、阿坝(42 730 m^3)和广安(10 027 m^3)，后 3 位是眉山(607 m^3)、自贡(603 m^3)和遂宁(387 m^3)。显然，四川省的可用水资源空间差异很大。

3.2.2 资源环境压力的空间差异分析

根据本文的研究结果(图 5)，就生态压力而言，2013 年四川省的甘孜和阿坝很低(I_a)，广元中上(II_b)，成都、自贡和攀枝花等其余 19 市(州)很高

表 2　四川省各市州 2013 年生态足迹、碳足迹和水足迹的测算结果

Table 2　Ecological footprint, carbon footprint and water footprint of cities in Sichuan Province in 2013

市(州) Cities (States)	人均生态足迹 Ecological footprint per capita ($hm^2 \cdot person^{-1}$)	人均生物承载力 Biocapacity per capita ($hm^2 \cdot person^{-1}$)	人均生态赤字 Ecological deficit per capita ($hm^2 \cdot person^{-1}$)	人均碳足迹 Carbon footprint per capita ($t \cdot person^{-1}$)	碳足迹密度 Carbon footprint density ($t \cdot hm^{-2}$)	人均水足迹 Water footprint per capita ($m^3 \cdot person^{-1}$)
成都 Chengdu	3.62	0.30	3.31	4.09	13.49	570.72
自贡 Zigong	4.73	0.50	4.23	5.62	11.30	692.82
攀枝花 Panzhihua	15.27	0.87	14.40	35.31	40.81	826.14
泸州 Luzhou	4.87	0.65	4.22	5.44	8.38	615.34
德阳 Deyang	2.72	0.57	2.15	4.10	7.15	546.91
绵阳 Mianyang	2.78	0.84	1.94	2.68	3.18	505.81
广元 Guangyuan	2.94	1.22	1.72	5.19	4.25	491.56
遂宁 Suining	2.40	0.49	1.91	2.74	5.60	437.74
内江 Neijiang	4.97	0.40	4.57	9.92	24.57	602.84
乐山 Leshan	4.96	0.65	4.31	9.30	14.26	594.73
南充 Nanchong	2.18	0.53	1.65	1.96	3.68	458.73
眉山 Meishan	5.13	0.88	4.24	10.06	11.40	557.22
宜宾 Yibin	5.09	0.75	4.33	4.53	6.02	526.27
广安 Guang’an	4.25	0.59	3.67	4.33	7.38	596.80
达州 Dazhou	4.57	0.60	3.97	4.29	7.15	498.34
雅安 Ya’an	3.77	1.21	2.56	−10.83	−8.95	431.64
巴中 Bazhong	2.61	0.76	1.85	2.74	3.59	519.67
资阳 Ziyang	3.83	0.56	3.26	3.44	6.11	659.80
阿坝 Aba	2.61	5.02	−2.41	−18.61	−3.71	460.09
甘孜 Ganzi	2.23	5.94	−3.71	−13.18	−2.22	433.51
凉山 Liangshan	4.22	1.36	2.86	2.98	2.19	601.65

(III_b)；GHGs 排放状况，攀枝花很高(III_b)，内江较高(III_a)，乐山中上(II_b)，眉山为中下(II_a)，甘孜、雅安和阿坝属碳汇(I_a)，成都、自贡和泸州等其余 14 市(州)均属较低(I_b)等级；水资源压力方面，自贡、遂宁、眉山、内江和资阳的压力很高(III_b)，成都较高(III_a)，泸州和达州为中上(II_b)，德阳为中下(II_a)，宜宾和攀枝花较低(I_b)，甘孜、阿坝和广安等其余 10 州(市)的压力很低(I_a)；资源环境压力可分为 3 大类 6 个亚类：阿坝、甘孜、雅安和广元的压力很低(I_a)，凉山和绵阳为较低(I_b)，广安、巴中和南充为中下(II_a)，宜宾、德阳、乐山和达州为中上(II_b)，泸州、资阳和成都较高(III_a)，遂宁、攀枝花、眉山、自贡和内江的压力很高(III_b)。

4　讨论与结论

生态文明建设评价的本质是定量测度区域资源节约与环境友好型社会建设的实现程度。其中，对资源与环境压力的评估是区域生态文明建设决策的基本依据。本文基于足迹家族理论，从区域所承受的生态压力、社会经济发展的资源约束以及环境保护等方面综合考虑，构建了由生态压力指数、温室气体排放指数和水资源压力指数构成的资源环境压力指数。通过对四川省的实证研究发现，与当前相关测评方法相比较，该方法可以克服单一指标无法全面反映人类活动对生态环境的影响，同时也可以弥补多指标综合评价受人为因素影响较大的缺陷。通过对四川省 1990—2013 年的资源环境压力评价的实证研究，证明该评价体系可适用省、市多尺度研究，具有良好的时空可比性。今后研究中，将进一步探索社会足迹的测评方法，以丰富和扩展足迹家族评价指标体系，并通过更多的实证研究修订相关指标及参数，为全面综合评价区域生态文明建设提供科学有效的评价方法。

将本文构建的基于足迹家族原理的资源环境压力评价体系应用于四川省 1990—2013 年的资源环境压力评估，主要结论如下：

1)1990—2013 年，四川省生态足迹年均增加 3.27%，而生物承载力变化不大，引起生态压力指数大幅攀升，生态压力的变化可划分为 4 个阶段：1990—1992 年为中下(II_a)，1993—1996 年为中上(II_b)，1997—

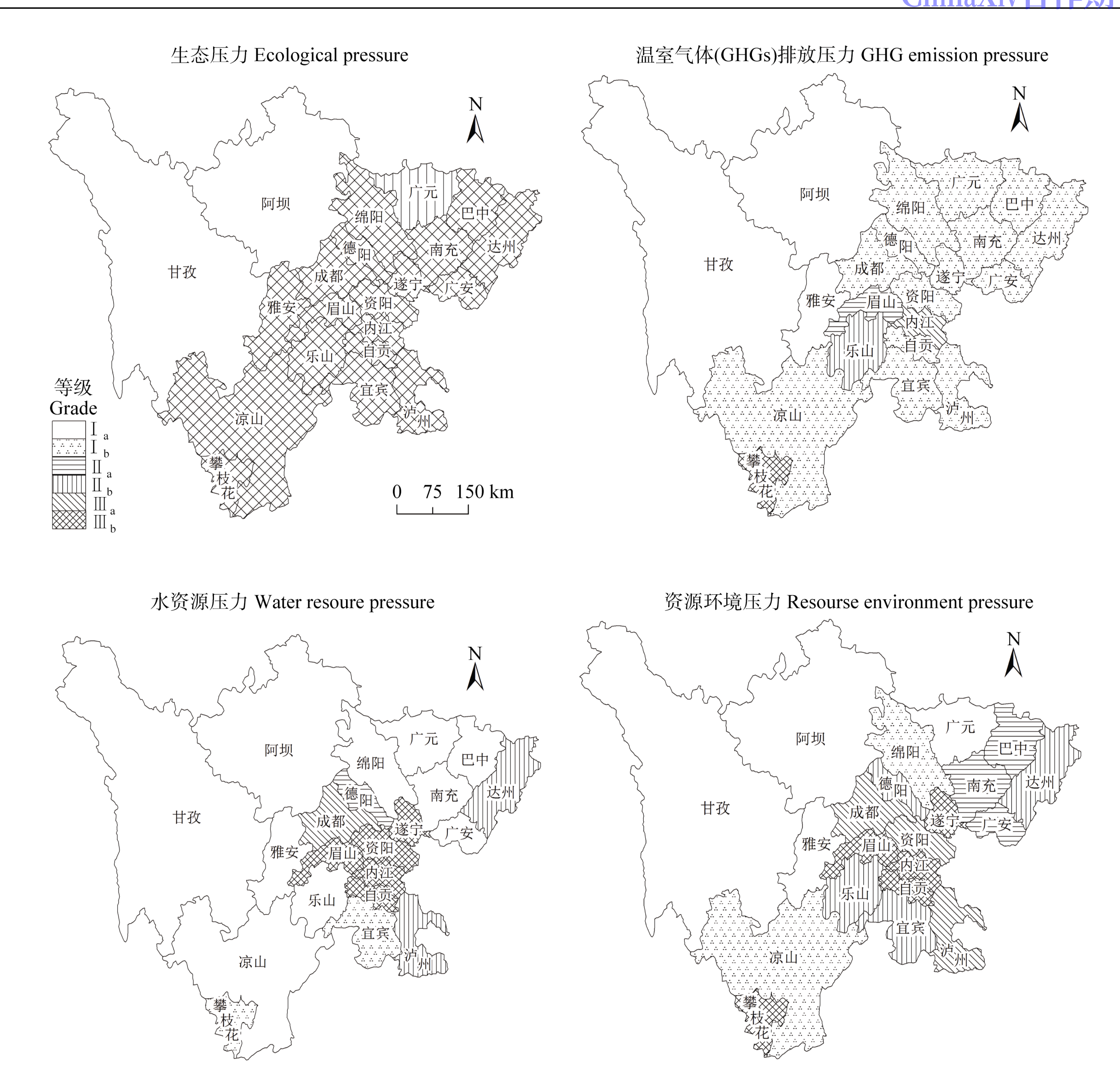


图 5 2013 年四川省资源环境压力的空间变化

Fig. 5 Spatial changes of resource environment pressure of Sichuan Province in 2013

2001 年为较高(III$_a$), 2002 年以后升为很高(III$_b$)等级。空间上, 甘孜和阿坝很低(I$_a$), 广元中上(II$_b$), 成都、自贡和攀枝花等其余 19 市(州)很高(III$_b$)。

2)1990 年以来全省林业碳汇提高了 32.01%, 全省 GHGs 排放虽然保持较低(I$_c$)水平, 但 GHGs 排放指数增高 234.97%。空间上, 攀枝花的 GHGs 排放等级很高(III$_b$), 内江较高(III$_a$), 乐山中上(II$_b$), 眉山为中下(II$_a$), 甘孜、雅安和阿坝属碳汇(I$_a$), 成都、自贡和泸州等其余 14 市(州)均属较低(I$_b$)等级。

3)四川省 1990—2013 年的水足迹增速很小, 可用水资源量较高, 水资源压力很低(I$_a$), 但可用水资源量减少的现象不容忽视。空间上, 自贡、遂宁、眉山、内江和资阳的压力很高(III$_b$), 成都较高(III$_a$), 泸州和达州为中上(II$_b$), 德阳为中下(II$_a$), 宜宾和攀枝花较低(I$_b$), 甘孜、阿坝和广安等其余 10 州(市)很低(I$_a$)。

4)四川省资源环境压力可划分为 3 个时期: 1990—1997 年为很低(I$_a$)等级, 1998—2003 年上升至较低(I$_b$)等级, 2004 年以后继续上升到中下(II$_a$)等级。空间上, 阿坝、甘孜、雅安和广元的压力很低(I$_a$), 凉山和绵阳较低(I$_b$), 广安、巴中和南充为中下(II$_a$), 宜宾、德阳、乐山和达州为中上(II$_b$), 泸州、资阳和成都较高(III$_a$), 遂宁、攀枝花、眉山、自贡和内江很高(III$_b$)。

5)四川省的资源环境压力主要归因于较高的生态压力。今后的生态文明建设中, 除了严守耕地生态红线以确保耕地生产力外, 还要通过大力发展水电以优化能源消费结构, 以及加强森林保育以提高碳汇潜力。

参考文献 References

[1] 黄勤, 曾元, 江琴. 中国推进生态文明建设的研究进展[J].

中国人口·资源与环境, 2015, 25(2): 111–120
Huang Q, Zeng Y, Jiang Q. Progress and prospect of the study on "Making great efforts to promote ecological civilization construction"[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(2): 111–120

[2] 周宏春. 生态文明建设的路线图与制度保障[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 157–162
Zhou H C. Roadmap and institutional arrangement for the construction of ecological civilization in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(2): 157–162

[3] 崔旭, 葛元英, 白中科. 黄土区大型露天煤矿区生态承载力评价研究——以平朔安太堡露天煤矿为例[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 422–427
Cui X, Ge Y Y, Bai Z K. Ecological carrying capacity assessment of large-scale open coal mines in loess zones — A case study of Antaibao Opencast Mine in Pingshuo[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 422–427

[4] 王长建, 汪菲, 张小雷, 等. 干旱区经济增长对城镇化和生态环境压力的影响分析[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(2): 206–213
Wang C J, Wang F, Zhang X L, et al. Quantitative analysis of the economic growth influence on urbanization and ecological environment pressure in Xinjiang[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 31(2): 206–213

[5] 叶文, 王会肖, 许新宜, 等. 资源环境承载力定量分析——以秦巴山水源涵养区为例[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 1061–1072
Ye W, Wang H X, Xu X Y, et al. Quantitative analysis of resource and environment carrying capacity for water conservation area in Qin-Ba Mountains[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(8): 1061–1072

[6] 王永刚, 王旭, 孙长虹, 等. IPAT 及其扩展模型的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 949–957
Wang Y G, Wang X, Sun C H, et al. Research progress on the application of IPAT model and its variants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 949–957

[7] 宋静, 王会肖, 刘胜娅. 基于 ESI 模型的经济发展对生态环境压力定量评价[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 368–374
Song J, Wang H X, Liu S Y. Quantitative assessment of stress of economic development to environment using ecological stress index[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(3): 368–374

[8] 赵卉卉, 王远, 谷学明, 等. 基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2025–2032
Zhao H H, Wang Y, Gu X M, et al. Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2025–2032

[9] 史利洁, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 650–658
Shi L J, Wu P T, Wang Y B, et al. Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 650–658

[10] Galli A, Wiedmann T, Ercin E, et al. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "Footprint Family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet[J]. Ecological Indicators, 2012, 16: 100–112

[11] Galli A, Weinzettel J, Cranston G, et al. A Footprint Family extended MRIO model to support Europe's transition to a One Planet Economy[J]. Science of the Total Environment, 2013(461/462): 813–818

[12] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1647–1659
Fang K. Footprint family: Concept, classification, theoretical framework and integrated pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1647–1659

[13] Borucke M, Moore D, Cranston G, et al. Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework[J]. Ecological Indicators, 2013, 24: 518–533

[14] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592–597
Liu M C, Li W H, Xie G D. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(3): 592–597

[15] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁, 等. 中国的生态空间占用研究[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 20–23
Xie G D, Lu C X, Cheng S K, et al. Evaluation of natural capital utilization with ecological footprint in China[J]. Resources Science, 2001, 23(6): 20–23

[16] 张桂宾, 王安周. 中国中部六省生态足迹实证分析[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 598–601
Zhang G B, Wang A Z. The ecological footprint of middle China in 2004[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 598–601

[17] 赵先贵, 马彩虹, 肖玲, 等. 西安市温室气体排放的动态分析及等级评估[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1982–1990
Zhao X G, Ma C H, Xiao L, et al. Dynamic analysis of greenhouse gas emission and evaluation of the extent of emissions in Xi'an City, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1982–1990

[18] 赵先贵, 马彩虹, 肖玲, 等. 陕西省碳足迹时空变化研究[J]. 地理科学, 2013, 33(12): 1537–1542
Zhao X G, Ma C H, Xiao L, et al. Spatio-temporal changes of carbon footprint in Shaanxi Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(12): 1537–1542

[19] 马晶, 彭建. 水足迹研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5458–5466
Ma J, Peng J. Research progress on water footprint[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5458–5466

[20] Ercin A E, Hoekstra A Y. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis[J]. Environment International, 2014, 64: 71–82

[21] 赵达伟, 赵先贵, 张丽慧, 等. 襄垣县虚拟水消费的时空变

异分析[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2010, 44(2): 315–318
Zhao D W, Zhao X G, Zhang L H, et al. Analysis on the spatial and temporal variety of virtual water consumption in Xiangyuan County[J]. Journal of Huazhong Normal University: Natural Sciences, 2010, 44(2): 315–318

[22] 孙才志, 张蕾. 中国农产品虚拟水–耕地资源区域时空差异演变[J]. 资源科学, 2009, 31(1): 84–93
Sun C Z, Zhang L. Changes in spatial and temporal differences of agricultural product virtual water versus cultivated land in China[J]. Resources Science, 2009, 31(1): 84–93

[23] 赵先贵, 肖玲, 马彩虹, 等. 基于生态足迹的可持续评价指标体系的构建[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1202–1207
Zhao X G, Xiao L, Ma C H, et al. Design of sustainability indicators system based on ecological footprint[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(6): 1202–1207

[24] 赵先贵, 马彩虹, 高利峰, 等. 基于生态压力指数的不同尺度区域生态安全评价[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 135–138
Zhao X G, Ma C H, Gao L F, et al. Assessment of ecological safety under different scales based on ecological tension index[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6): 135–138

[25] 代稳, 张美竹, 秦趣, 等. 六盘水市水资源安全的水足迹分析[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(5): 38–42
Dai W, Zhang M Z, Qin Q, et al. Water footprint analysis of water resources security in Liupanshui City[J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(5): 38–42

[26] Stern N. Stern Review: The Economics of Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007

[27] Galli A. On the rationale and policy usefulness of Ecological Footprint Accounting: The case of Morocco[J]. Environmental Science & Policy, 2015, 48: 210–224